

第一部 偏向電磁石光源用の光位置モニター

はじめに

この講義ノートは、放射光の位置変動を測定するための光位置モニターについて解説したものです。

放射光の利用が高エネルギー物理学実験用のシンクロトロンに寄生する形で始まった第一世代では、放射光の位置の安定性は大変悪かったようで、実験をしているとビームがすーとうごいて消えてしまい、ビームの位置を追いかけてながら大変苦勞してやっとデータをとったという話をこのころ実験を経験された方々から、よく聞きます。第二世代の放射光専用の電子（陽電子）ストレージリングの発展により、ビームが視界（ビームライン）から消えてしまうということはなくなりましたが、行われる実験が精密化されるにつれ、また、最近のストレージリングの低エミッタンス化に伴い、放射光の位置の安定性の問題が再びクローズアップされ、放射光の位置変動を観測するためのモニターが開発されてきました。現状では、偏向電磁石（BM）よりの放射光の位置を観測するための位置モニターについては、満足のいくモニターが数種類開発され、 μm の精度で放射光位置を観測できるようになりました。最近の話題は、挿入光源からの輝度の高い、かつ、空間方向にも、エネルギー方向にも複雑な構造を持った光の位置をどのようにモニターするかという問題に向いてきています。

この講義（ノート）では、第一部で、偏向電磁石からの放射光用の光位置モニターについて、偏向電磁石からの放射光について簡単に解説した後、現在までに開発された偏向電磁石からの放射光用のモニターについて解説します。第二部では、挿入光源用の光位置モニターについて、挿入光源からの放射光について偏向電磁石の場合と同じように解説し、挿入光源用のモニターについて解説したいと思います。

第一章偏向電磁石よりの放射光

ここでは、偏向電磁石からの放射光の性質を簡単に説明し、どのような光を相手にするのかについて考える。

1-1 シンクロトロン放射の指向性

ほとんど、光速に近い速度で走っている電子（本来荷電粒子ならなんでもよいが、ここでは電子としておく。陽電子は電子と同じである）が磁場等によって、曲げられるときに放出する光は電子の静止している系とは、大変異なる。まず、電子の静止系（電子が止って見える系、すなわち動いている電子に乗って見る）に移ってみると、磁場から受ける力はローレンツ力であるから、電子は円軌道の法線方向に加速度を受け、双極放射を周囲に放射する。従って、特に、ある特定の方向に光が集中して放射されることはない。この様子を図1-1に示す。

加速度の方向

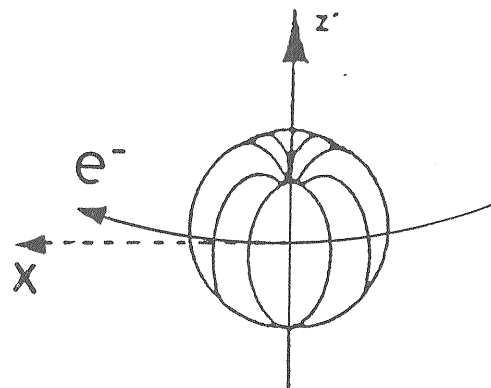


図1-1 電子の静止系での双極放射の放射分布

さて、次にこのような放射が実験室系、すなわち、電子が動いている系で我々にどのように見

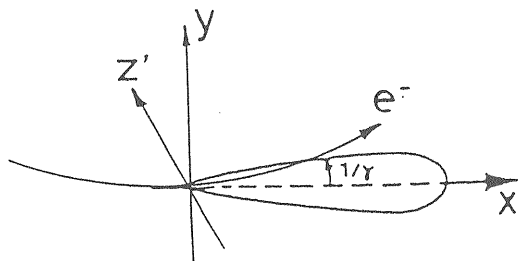
えるのかを考えてみる。

電子の静止系と、動いている系での放射の方向を見るには光の放射される方向を示す波数ベクトルがどのように変換されるかを見ればよい。波数ベクトル k の変換は、ローレンツ変換を用いて、

$$k'_x = \frac{k_x - \beta}{1 - k \cdot \beta} \quad - 1-1$$

$$k'_y = \frac{k_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - k \cdot \beta}$$

従って、図 1-1 に示す様な双極放射の放射分布は光の波数ベクトル k をローレンツ変換すると図 1-2 の様な分布になる。



Lab 系

図 1-2 電子の動いている系での放射分布

また、光の波長もローレンツ変換をうけて、

$$\lambda' = \frac{\lambda \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} \quad 1-2$$

となるので、電子の静止系でみて電子の進行方向にでる光は、反対方向にでる光と波長は対称的でも、動いている系では電子の進行方向にでる光は波長が非常に短く（電子が光速に近い速度のとき）、反対方向にでる光の波長は逆に非常に長くなる（ドップラーシフト）。これらのことから、放射の大部分のエネルギーは、電子

の静止系でみて電子の進行方向にでる光による、すなわち動いている系で見て、 $1/\gamma$ 角度内に放射される光に集中していることがわかる。

1-2 シンクロトロン放射の波長について

偏向電磁石からの 1 電子によるシンクロトロン放射を遠方（光の位相がほぼ平面波に見えるような）で観測した場合を考える。1-1 でわかったように光速に非常に近いスピードで動いている電子は、 $\sim 1/\gamma$ の角度の中に大部分の光を放射するので、遠方で観測している観測者には、電子が偏向電磁石の中で $\sim 1/\gamma$ の角度だけ円軌道を描いて回転するとき放射されるパルス光を見ることになる。すなわち円軌道の半径を ρ とすると、

$$\Delta S = \rho \theta \sim \rho / \gamma \quad -1-3$$

なる距離に相当する時間幅、

$$\Delta t = \rho / 2 c \gamma^3 \quad -1-4$$

のパルス光を観測者は受け取ることになる。さて、光パルスのスペクトルは、パルスの時間表現のフーリエ変換の二乗で与えられる。ここで、パルスの半値全幅およびスペクトルの半値全幅を $\Delta t, \Delta \omega$ とすると、両者の積、すなわち、時間バンド幅積に対して、

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq K \quad - 1-5$$

の関係が成り立つ。ここで K は、ほぼ 1 のオーダーの定数で、光パルスの波形による。さて、この時間バンド幅積の関係を用いて放射光の波長のひろがりをおおまかに調べてみることにする。簡単のために、時間バンド幅積を 1 とすると

$$\Delta\omega = 1 / \Delta t \quad - 1 - 6$$

であるので、 Δt に1-4式を代入すれば、

$$\Delta\omega = 2 c \gamma^3 / \rho \quad - 1 - 7$$

となる。とくに通常、

$$\omega_c = 3/2 c \gamma^3 / \rho \quad - 1 - 8$$

なる周波数を臨界周波数 (critical frequency) という。

ここで γ は電子のエネルギーを E とすれば、

$$\gamma = E / m_e c^2 \quad - 1 - 9$$

であるから、臨界周波数は、

$$\omega_c = 3/2 E^3 / m_e^3 \rho c^5 \quad - 1 - 10$$

又は、光のエネルギーで書けば、

$$E_c = h \omega_c = 3/2 h E^3 / m_e^3 \rho c^5 \quad - 1 - 11$$

$$= 2218 R (m) / E^3 (\text{GeV})$$

ここで例えば、PFの $E=2.5\text{GeV}$ 、 $\rho=8.33\text{m}$ を代入すれば、 E_c として4 keVが、また最近完成したESRF (ヨーロッパ放射光施設) の6 GeV, 14.5mを使えば、 E_c として19.2 keVが得られる。

1-3 シンクロトロン放射のスペクトル および角度分布についてのより定量的な取り扱い

前節までに、シンクロトロン放射の性質について定性的に説明したが、本節では具体的にスペクトルおよび角度分布についての計算例を示す。偏向電磁石による放射光のフラックス F は観測方向と軌道面との傾を ϕ とすると

$$\frac{d^2F}{d\omega d\Omega} = \frac{3\alpha \gamma^2}{4\pi^2 \omega c} \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 (1 + (\gamma\phi)^2)^2$$

- 1 - 12

$$\times \left[\frac{K_{2/3}^2(\eta)}{3} + \frac{(\gamma\phi)^2}{1 + (\gamma\phi)^2} \frac{K_{1/3}^2(\eta)}{3} \right]$$

であたえられる。ここで K は変形されたベッセル関数である。また α は微細構造定数、 η は

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\omega_c} (1 + (\gamma\phi)^2)^{3/2}$$

- 1 - 13

で与えられる。式1-12で $K_{2/3}$ の項は、偏光の水平成分を $K_{1/3}$ の項は偏光の垂直成分をそれぞれ与える。

図3に電子のエネルギーを6 GeV, 偏向電磁石のフィールドを0.85 Tとしたときの $\phi=0$ (光軸上)の放射光のフラックス F を計算した結果を示す。

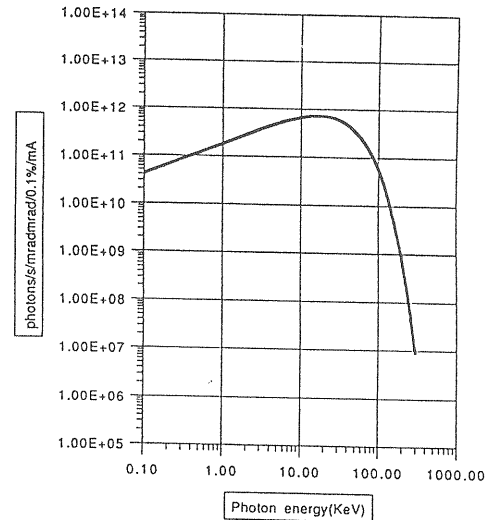


図1-3 偏向電磁石光源による光軸上での放射光のスペクトル

この図より、放射光のスペクトルはほぼ臨界波長に極大を持つようななだらかな白色スペクトルとなる。

次に図1-4に放射光の角度分布について、いくつかの波長について計算した結果を示す。

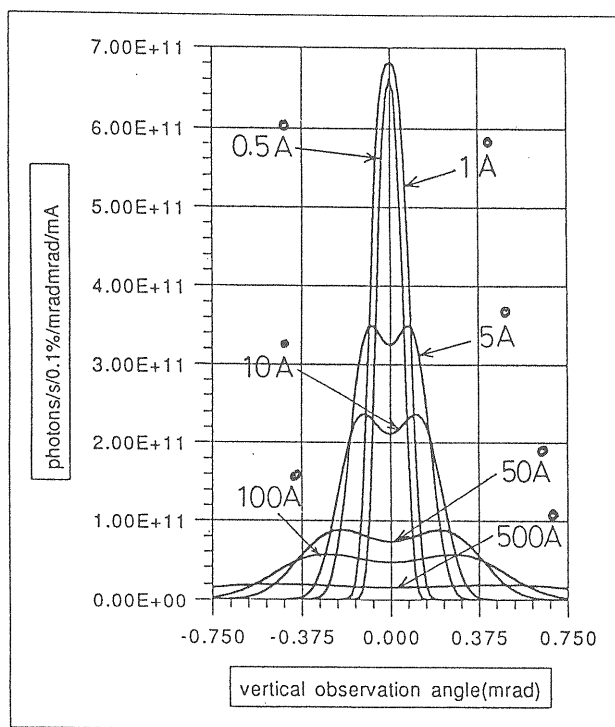


図 1-3 偏向電磁石光源による放射光の角度分布

長波長側では、垂直の偏光成分がかなり大きく強度分布は軌道面を缺んで二山の分布になる。

第二章偏向電磁石よりの放射光用の光位置モニター

この章では、偏向電磁石よりの放射光用の位置モニターについて原理別に解説する。

現在までに発表されている光モニターは次の5種類のタイプのものである。

- i) 蛍光板上の蛍光像の画像解析によるもの
- ii) チョッパー型モニター
- iii) 二分分割陰極型イオンチェンバー
- iv) 蛍光X線を利用したモニター
- v) 光電子放出を利用したモニター

初めから4種類のもは特定の条件下（ビームを大幅にじゃまするとか、ビームラインの真

空に挿入できない等）でのみビームラインに挿入できるので簡単な紹介にとどめ、最後の光電子放出を利用したモニターについては、現在広く利用されて主流となっているモニターであるのでビームラインに挿入する時の問題などを含めやや詳しく解説する。

2-1 蛍光板上の画像解析によるモニター

このタイプのモニターは図2-1に示す様に、ビームラインに放射される光ビームの端の一部を蛍光板で受けて、その蛍光をTVカメラによって観察し、画像解析にかけて光ビームの位置を見ようというものである。

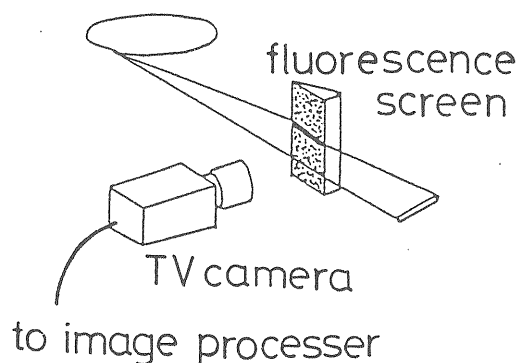


図 2-1 蛍光板上の画像解析によるモニターシステム。

このモニターの分解能は、蛍光体の粒度、カメラレンズの拡大率、TVカメラのCCDの画素数などで制限され、50 μmよりも良くすることは難しいが、比較的外乱に強く長時間の安定性が、100 μm以下/1カ月とすぐれており、PFリングが低エミッタンス化されて目立つようになった光ビームの一日内の周期的な動きを低エミッタンス化される以前から観測していた図2-2にこの光ビームの一日内の周期的な動きを観測した例を示す。

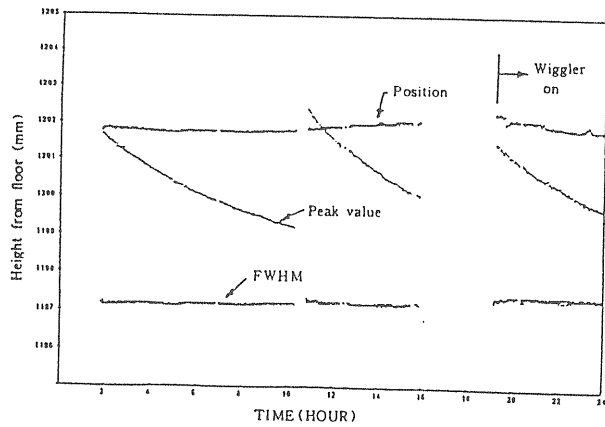


図 2-2 蛍光板上の画像解析によるモニターによるPFでの光ビームの一日内の周期的な動きの測定例。

2-2 チョッパー型モニター

この型のモニターは適当な蛍光体を塗ったリードを放射光のなかで、高速で振動させて、光位置を観測しようというモニターである¹⁾。図2-3に概略を示す。ビームラインに出てくる放射光の端の部分(5mm程度)に、ZnS(Ag)蛍光体を塗布したリードを挿入して、リードを縦方向に振幅12~20mm、周波数60~2000Hzで振動させる。蛍光体によって可視光に変換されたシグナルを光電子増倍管で受けて光位置がリードの振動中心からずれるときの、リードの振動とシグナルの振動の位相のずれを検出して光位置を計るモニターである。

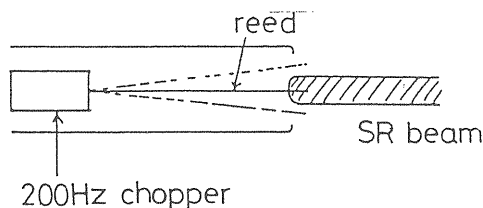


図 2-3 チョッパー型モニターの概略

2-3 二分割陰極型イオンチェンバー

このモニターはイオンチェンバーの陰極をその対角線にそって二つの直角三角形に分割した構造をしている^{2) 3)}。このモニターではX線が陰極と陽極の間を通過するときに行けるイオンを上下に分割された陰極に収集し、光が動くと、二つの陰極に流れ込むイオン電流に差ができることにより、光の位置を計るものである。イオン電流を読みだすために陽極に数百Vの電圧をかける。図2-4に、このモニターの概略を示す。

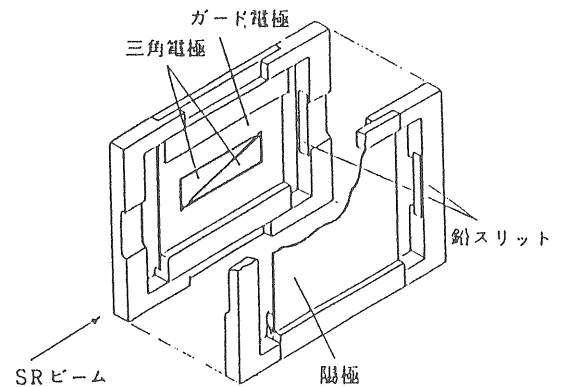


図 2-4 二分割陰極型イオンチェンバーの構造の概略

このモニターで測定できるダイナミックレンジおよび直線性は陰極の高さ方向の大きさと、加工精度できまるが、 ± 2.5 mmのダイナミックレンジおよび1%程度の直線性を得るのは容易である。電極間隔はビームラインに取り出される光ビームの幅におおじて最大40mm程度までは可能であるが、イオンチェンバーとして飽和電流領域で使用できるのはせいぜい12mm程度までで、それ以上の間隔で飽和電流領域に持って行こうとすると、陽極電圧が高くなりすぎて使用上取り扱いが手軽でなくなる。電極間隔が広い場合には、イオンチェンバーの比例領域で使用することになるので、陽極電圧の安定化に注意が必要である。

このモニターでのビームの位置のずれdは、

三角電極の高さを h 、上下電極のイオン電流を I_u 、 I_l とすると

$$d = \frac{h(I_u - I_l)}{2(I_u + I_l)} \quad \text{-- 2-1}$$

で与えられる。光位置の測定について $0.1 \mu\text{m}$ 程度の分解能を得るのはさほど困難ではない。

このモニターの問題点としては、チャンバーのなかに流すガス（通常は Q ガスやヘリウムガス）の流量に大変敏感なことで、例えば、ガスの大気放散の出口に大気とのシールドのためにバブラーをつけてブクブクさせただけでも、数 μm 程度の光ビーム位置変動のように見えたこともあった。このモニターはビームラインの真空中にそのまま挿入することはできないので、ビームラインのモニターとしては、あまり用いられてはいないが、PF ではポータブル化され、手軽に実験装置の入射側などに置いてテンポラリーな光位置モニターとして使用されている。

2-4 蛍光 X 線を利用したモニター

このモニターは図 2-6 に示すような形状のタンタル製のターゲットを X 線ビームの中に挿入して、このターゲットからの二次蛍光 X 線をシンチレーションカウンターで観測して光ビーム位置を出そうとするものである⁴⁾。

このモニターは光ビームをかなり遮るという問題点がある。

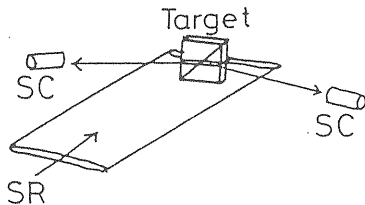


図 2-6 蛍光 X 線を利用したモニター

2-5 光電子放出を利用したモニター

光電子放出を利用したモニターは真空（低真

空から超高真空まで）に引かれたビームラインに直接挿入でき、VUV 領域から、高エネルギー X 線領域までの広い波長領域に感度があり、安定度、位置分解能、ダイナミックレンジの点でも優れているので、何種類かのタイプのものが、開発され広く使用されている。ここでは多少詳しく解説する。

2-5-1 光電極の光電子放出の量子効率の分光特性

金属表面での光電子放出の量子効率は、あまり大きくなく、金属表面への直入射で、せいぜい % の大きさである。分光特性は金属表面への直入射のもとでは、UV から VUV の領域にかけて極大を示すような分布であるが、金属原子の電子構造による光電吸収のエッジ構造に相当する不連続な変化があることに注意しなければならない。図 2-7 に銅、アルミニウム⁵⁾（直入射）図 2-8 にタングステン⁶⁾（ 50 mrad 入射）の光電子放出の量子効率の分光特性を示す。

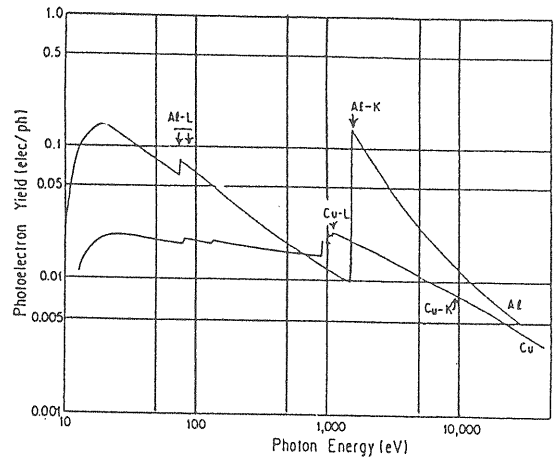


図 2-7 銅、アルミニウム（直入射）の光電子放出の量子効率の分光特性

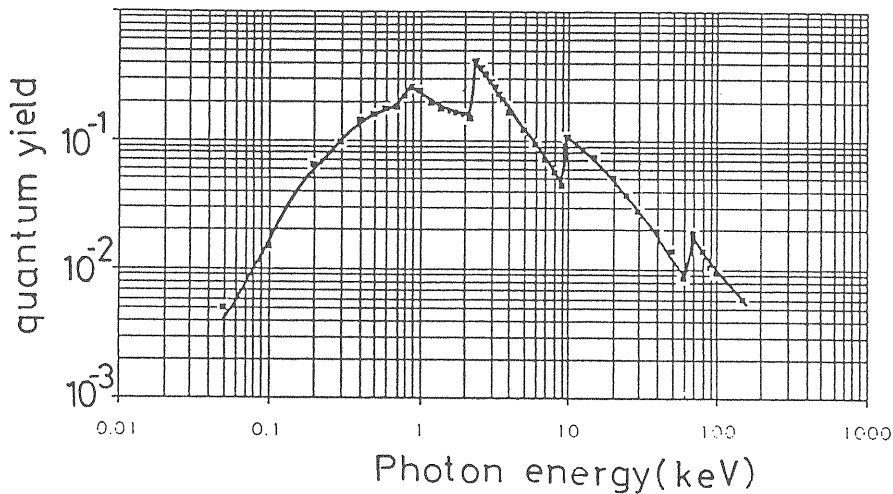


図2-8 タングステン (50 mrad入射) の光電子放出の量子効率の分光特性

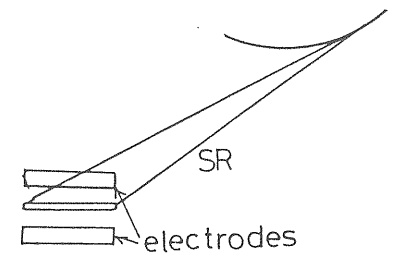


図2-9 光の分布を部分的に積分する電極配置

2-5-2 光電極の形状によるモニターの形式の分類

光電子放出型のモニターは光電極を光ビームの中に置き、光ビームに晒されない所に置かれた陽極（バイアス電極）とのあいだに流れる光電流を観測する構造が基本であるので、光ビームに対する光電極の形と配置をどのようにするかで、おおまかに二者類の形式に分けられる。光電極の挿入できる場所は、ビームライン下流における実験に支障がないことが最低条件であるので、光ビームの実験に用いられない部分になるが、通常、このような部分はビームラインに設置されているマスクないスリットなどにより、切り取られるところである。

(1) 光の分布を部分的に積分する電極配置

この配置は光ビームの上下の裾野の部分に図2-9に示すように2つの光電極を配置する。この配置では、放射光の縦方向の強度分布を $f(z)$

光ビームの位置を p とすると、上下の電極の光電子数は、

$$n_u = \zeta \int_1 dl \int_{z_1}^{z_2} f(z+p) dz \quad - 2 - 4$$

$$n_l = \zeta \int_1 dl \int_{-z_1}^{-z_2} f(z+p) dz$$

ここで ζ は光電子放出の量子効率である。光ビームの位置信号 P は

$$P = c \frac{n_u - n_l}{n_u + n_l} \quad - 2 - 5$$

ここで c は電極の実際の構造とその間隔で決まる比例定数である。さて、光の強度分布 $F(Z)$

(Z)は第一章に述べたような分布であるから、式2-5は z に対して線形とはならない(ただしこの非線形性は実用上問題となるほどのことはない)。また、 $F(Z)$ の実際の上下の対称性が良くないと(実際のビームラインではよくある)この電極配置では光位置の物理的な意味は、はっきりとしないものになってしまう。

(1) 光の分布を積分する電極配置

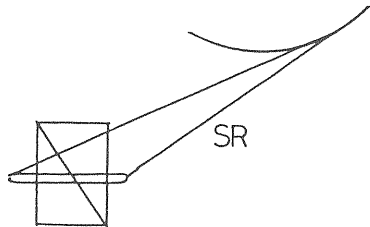


図 2-10 光の分布を積分する電極配置

図 2-10 のような二枚の直角三角形の電極を光ビームに挿入すると、上下の電極の光電子数は、直角三角形電極の長さを l 、高さを h とすれば、

$$n_u = \zeta \int f(z+p) \left(\frac{1}{2} + \frac{zl}{h} \right) dz \quad -2-6$$

$$n_l = \zeta \int f(z+p) \left(\frac{1}{2} - \frac{zl}{h} \right) dz$$

よって、光位置は

$$P = c \frac{n_u - n_l}{n_u + n_l} = \frac{2 \int f(z+p) z dz}{\int f(z+p) dz} \quad -2-7$$

となり、この形式によるモニターでは光位置の物理的な意味はビームの分布の重心となる。このことは、直角三角形電極を用いてビームの分布を積分するモニターの大きな特長である。

2-5-3 光の分布を部分的に積分する電極配置によるモニターの実例

この型のモニターに属するものとして、2-ワイヤーモニター、ロッドモニター、スリット型モニター、ブレード型モニター等が報告されている。

(1) 2-ワイヤーモニター

光ビームの上下の裾野に2本のタンゲステン線を張ったものである^{2) 7)}。図 2-11 に PPF で作られた物の概略を示す。

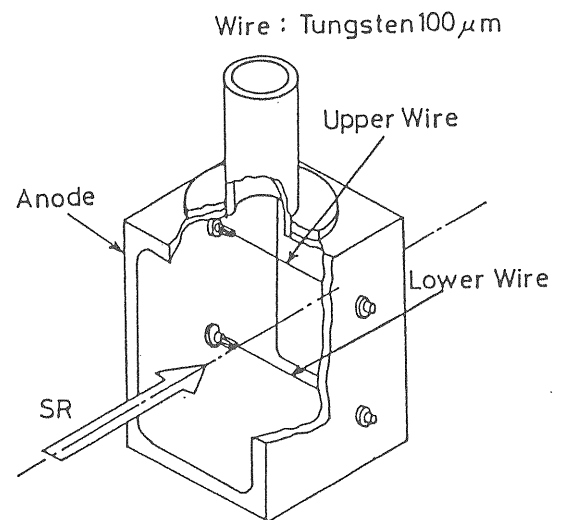


図 2-11 2-ワイヤーモニターの構造の概略

このモニターでの光ビーム位置の読みだし分解能は $1 \mu\text{m}$ 以下であるが、前節に述べたように、光ビームの分布の非線形性により、ダイナミックレンジは余り大きくはとれない。図 2-12 にモニターを上下にスキャンして測定したレスポンスを示す。

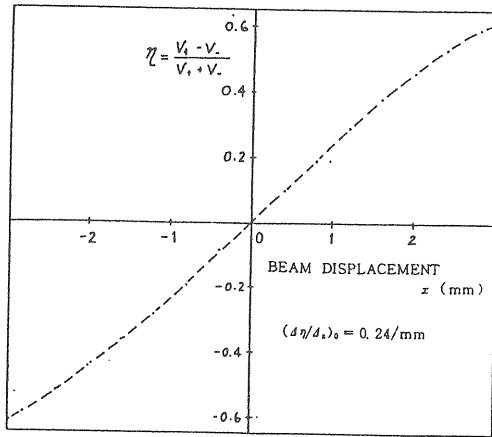


図2-12 2-ワイヤーモニター的位置感度

PFのものは、ワイヤーの直径が100 μ m、間隔が30mm、光源点からの距離10mにセットされているが、この条件で ± 1.5 mmぐらいは線形であり、実用上は十分である（たまにcmのオーダーも光ビームが動くリングがあるが！）。このモニターではワイヤーは熱の伝導が悪いので、光の強度が余り強くと融けてしまうのでワイヤーの間隔に注意が必要である。また光の水平方向の広がり大きいときは、ワイヤーの熱膨脹によるたわみが無視できなくなるので、余り広いものはできない。PFのものは幅が50mmである。また、ワイヤーは光から見て断面積が小さいので、光電子放出の断面積の小さな硬X線には感度がほとんどない。したがって、Be窓がある場合には、その前に置かないと観測ができない。ただし、このモニターは片方のワイヤーで光ビームの分布をスキャンして測定できるという大きなメリットがあるので1台は必ず備えたいモニターである。

(2) 2-ロッドモニター

このモニターは上の2-ワイヤーモニターのワイヤーのかわりに、2本の直径1.6mmのタングステンロッドを用いた物である⁸⁾。図2-13に構造の概略を示す。

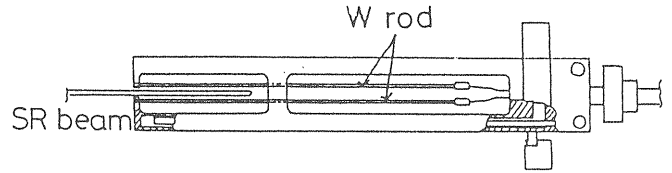


図2-13 2-ロッドモニターの構造の概略

2本のタングステンロッドは水冷されたフレームに固定されている。タングステンロッドを固定するフレームは、光ビームを挟む側で蟹の欠みのように開いており、光ビームの水平の開口角に対する制限はなくなっている。図2-13のものはタングステンロッドの間隔が8mmにセットされておりロッドの断面積がおおきいこともあって、2-ワイヤーモニターのように光ビームの裾野に広がってくる長波長成分を見るというよりは、X線用にも使えるようになっている。

(3) スリット型モニター

このモニターはビームラインに大抵組み込まれているスリットの上下の歯を光電極に利用したものである⁹⁾。図2-14に概略を示す。このモニターではユーザーの都合でスリットの条件を変えると継続的な観測ができなくなるので、その場合には、専用の電極を用意する必要がある。このモニターは、この節で紹介したもののなかでは、いちばん光ビームをじゃまするので、ビームラインのスリットを利用する以外では他のモニターに比べるとあまりメリットはないであろう。

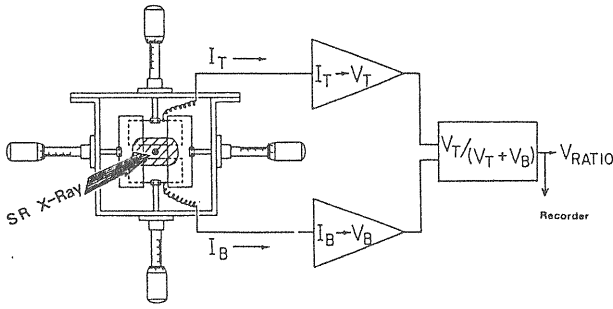


図 2-14 スリット型モニターの概略

(4) ブレード型モニター

ここではESRFで設計されたものを紹介する¹⁰⁾。直角三角形の電極（ブレード）を光ビームの上下に光ビームの光軸と（ほぼ）平行に配置する。

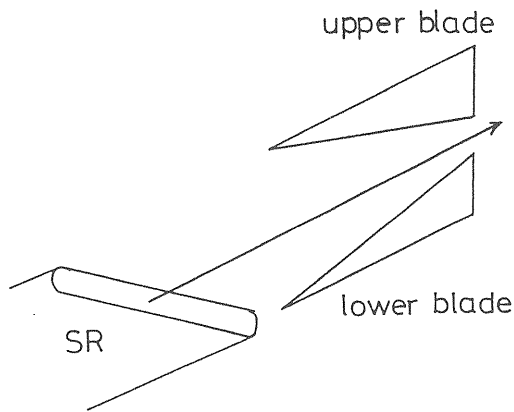


図 2-15 ブレード型モニターの概略

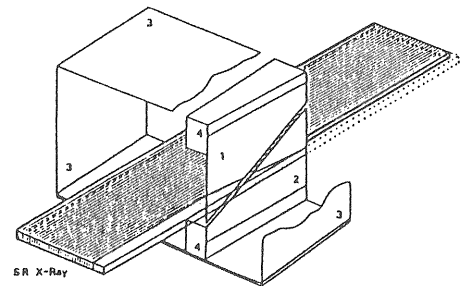
ブレード間のギャップはビーム中心の最高強度を避けて4～6mmに設定されている。この電極配置では高い感度を得ることはできないが、光ビームの強度が大きい場合は、感度が低いことは問題とはならないし、ブレードへの熱負荷が小さいので良い構造である。また、光ビームの水平方向の開口角の問題も存在しない。このデザインではブレード間のギャップが小さければ、実質的に直角三角形電極で光の分布を積分する電極配置に近いので、その点でも優れている。

2-5-4 光の分布を積分する電極配置によるモニターの実際

この方式のモニターは直角三角形電極2枚によって光電極が構成されている。

(1) 2分割モニター

バイアス電極に囲まれた中に、一对の直角三角形電極を置いた構造をいっている。図 2-16 に概略を示す¹¹⁾。



Schematic drawing of split electrode photo-emission monitor. It consists of (1) upper copper electrode, (2) lower electrode, (3) guard electrode as collector, and (4) insulator made of glass molded epoxy resin.

図 2-16 2分割モニターの概略

図 2-16 に示したものは、直角三角形電極の配置として、光ビームの光軸に対して平行から数度傾けてセットされており、光ビームの端を2～3mmほど切り取って観測する。光ビームに対する断面積は小さいので、熱負荷は小さく光ビームの水平方向の開口角の問題も存在しない。

(2) モリブデンメッシュによる直角三角形電極を用いたモニター¹²⁾

このモニターの特長は直角三角形電極にモリブデンワイヤーで編んだメッシュを使用し、光ビームに対してこの電極を直入射の配置にしている点である。図 2-17 にデザインの概略を示す。光電極に使われたメッシュは入射ビームに対して70%の透過率をもっている。このモ

ニターでは光電極のワイヤメッシュ構造はソリッドな構造に比べて熱伝達が悪いので、光ビームによるワイヤの加熱により、光電子放出だけではなく、熱電子放出も起こっていることが、報告されている。

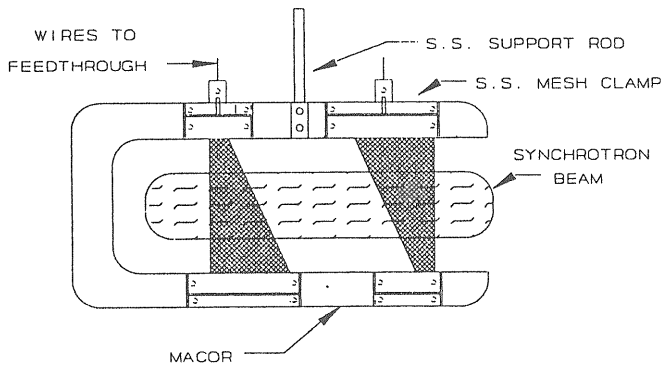


図2-17 モリブデンメッシュによる直角三角形電極を用いたモニターの概略

2-5-5 モニターの読みだし回路、およびマンニピュレーター

(1) モニターの読みだし回路

上下の電極の光電流の差によって、光位置を観測するモニターでは、ビームの位置Pは、校正によって求まる比例定数をCとして

$$P = C \frac{I_u - I_l}{I_u + I_l} \quad - 2-8$$

で与えられる。通常この演算はアナログ回路によって行われる。図2-5に読みだし回路のブロックダイアグラムを示す。

次節に述べるように、1 μ mの光位置変動に相当する上下の電極の光電流の差は、10⁻⁴ μ A程度になるので、初段のアンプは100pA位まで対応できるものを使用する必要がある。市販のピ

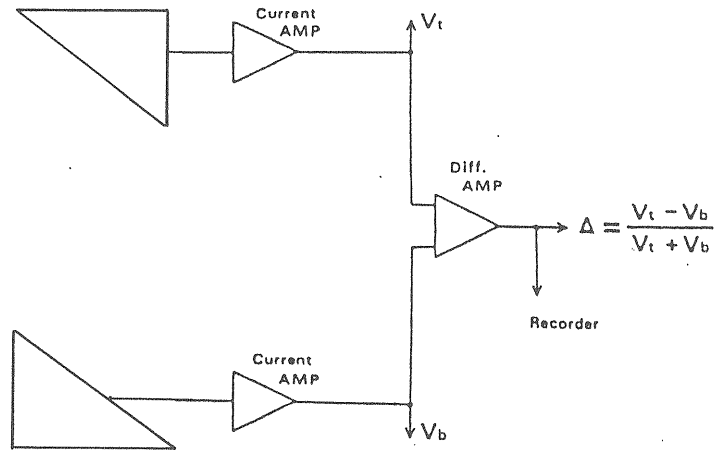


図2-5 二分割陰極型イオンチェンバーの読みだし回路のブロックダイアグラム

コアンメーターを使うことも出来るが、光位置モニターは台数が多いので、後段の差分回路も含めてPFでは専用の回路を設計し使用している。

(2) モニターを支持するためのマンニピュレーター

モニターはビームラインに固定してしまうと校正をするときに困る。また、光電極の熱膨脹の影響を避けるためにモニターは、出来るだけ上下の光電極がバランスして光にあたる条件で使用することが重要である。そこで、モニターは、通常縦方向の一次元マンニピュレーターの先にセットされている。このマンニピュレーターの駆動部はモニターをミクロンの精度で校正するために、ボールネジを用いた精密なものが必要である。また、リング運転時にはモニターにアクセスできない場合が多いので、大抵はパルスモーターで遠隔操作ができるようにしてある。

このマンニピュレーターにモニターの出力が常にゼロになるようなフィードバックをかけて、逆にマンニピュレーターの動きを読みだすことによっても、光位置を計ることができる¹³⁾。

この方式では、モニターの光電極はいつも同じように光ビームにあたるので、1) 電極の熱膨脹の問題を避けることができる、2) 非線形な位置レスポンスを持つモニターでも線形に使える、3) 上下電極の経時変化（カーボンのコンタミネーションなど）がバランスしている等のメリットがあるがシステムが複雑になると、光モニターの元来の目的である光ビームにフィードバックをかけるときに、フィードバックループが二重になるので、あまり用いられてはいない。

2-5-6 モニターをビームラインに挿入する際の注意

モニターそのものが、どんなによく出来ていてもビームラインの構造との相性が悪いと正常に働かない。このことは、モニター自身の話しではないので、あまり話題にのらないが、往々にして、このために重大な問題が生じるので、あえて一節を設け解説する。

ビームライン内の筒内反射による光ビームの強度分布の変形や、マスク、スリット、ベリリウム窓などによる光ビームの非対称なカット、また散乱光の混入、この散乱光の混入は前方からのみとは限らず、モニターの後方からもやって来る。まあ、よく設計され、よくアラインメントされたビームラインでは、筒内反射や光ビームの非対称なカットは無視できるが、マスク、スリット、ベリリウム窓などによる散乱光の混入は避けることができない。これらの散乱光は例えば、X線の散乱であれば、主光束の4~5桁落ちの強度であるが、上に述べたモニターは全てなんらかの形で、出力の差をとる形式であるので、この程度のバックグラウンドもばかにならない。たとえば、PFの実例で示すと直角三角形電極の積分型のモニターで、直角三角形電極の高さを40mmで、上下の電極の出力はリング電流300mAのとき2μA程度であるが、こ

のとき、光位置を算出する2-1式は、

$$P=c \frac{I_u-I_l}{I_u+I_l} = 20\text{mm} \frac{I_u-I_l}{4\mu\text{A}} \quad -2-9$$

となるので、1μmの光ビームの動きは、ΔIにして5x10⁻⁵μAとなる。。このことは主光束の4~5桁落ちのバックグラウンドの変化が、μmのオーダーの光ビームの動きに相当することになるわけである。このような影響はバックグラウンドが変化しなければ、オフセットとして処理できるが、ビームラインには可動のスリット、ビームシャッター等があるので、これらの構造物がモニターの近く（たいてい近くにある！）にあると、モニターが正常に働かなくなる。そこで、モニターをそれらの構造物からできるだけ離すことはもちろんのこと、モニターの電極に（光電極だけではなく、光電流が出入りするすべての電極）バックグラウンドになる散乱光が当たるのを防ぐため、モニターの上流、下流に専用のマスクを設置する必要がある。たまたにこのマスクをモニターの本体に付けてあるデザインを見受けるが、モニターを校正するためにモニター本体の方を光ビームに対して動かして校正するのが通常であるので、マスクが本体と一緒に動いてバックグラウンドを変化させるので、望ましい構造ではない。（いずれにしてもせつかくのモニターを正常に働かせるために、ビームラインの設計段階で十分に担当者と話しあうことが肝要である！）

第二部 挿入光源用の光位置 モニター

第三章挿入光源よりの放射光

この章では挿入光源用のモニターを解説する準備として挿入光源よりの放射光について、モニターにとって重要な二次元的な強度分布およびスペクトルについて述べる。挿入光源からの放射光の二次元強度分布、スペクトルは干渉効果のために複雑な分布をしており、残念ながら第一章の述べたような定性的な話しではモニターのことを考える参考にはとてもならない。そこで、ここでは計算コードによるシミュレーションの結果を使って解説する。

周期数Nの挿入光源による放射光のk次の高調波の光束密度（単位立体角、単位周波数あたりの光子数）は

$$\frac{d^2P_k}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2\gamma^2\xi^2}{c\pi^2} \left[\frac{\sin^2\left(\frac{n\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\left(\frac{\omega}{\omega_1} - k\right)^2} \right]$$

$$\times \left(|2s_0\gamma\theta \cos\phi - K_y(s_1 - s_{-1})|^2 \right.$$

$$\left. + |2s_0\gamma\theta \cos\phi - K_x(s_1 - s_{-1})|^2 \right)$$

- 3 - 1

と与えられる。ここで

$$\xi = \frac{k}{\left\{ 1 + (\gamma\theta)^2 + \frac{(K_x^2 + K_y^2)}{2} \right\}}$$

$$\omega_1 = \frac{2\gamma^2\omega_0}{\left\{ 1 + (\gamma\theta)^2 + \frac{(K_x^2 + K_y^2)}{2} \right\}}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{K_x \tan\phi}{K_y} \right)$$

$$X = 2\xi\gamma\theta \left(K_y^2 \cos^2\phi + K_x^2 \sin^2\phi \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Y = \xi \frac{(K_y^2 - K_x^2)}{4}$$

ここでJ_nは整数次のベッセル関数である。ここでリニアアングレータの様な、K_xがゼロの場合は上の式K_x=0とおけばよい。さて、手取り早く放射光の二次元分布とスペクトルがどんな感じになっているのかを把握するために、リニアアングレータについて計算した結果を以下に示す。シミュレーションに使用したアングレータはこれからは第三代リング向けのモニター開発が重要であろうから、ESRFに設置されたアングレータのうちの一台中を取り上げることにする。表1にアングレータおよび電子ビームのパラメータを示す。

表1 計算に用いたアングレータおよびビームのパラメータ

Insertion Device type: Undulator	
period [mm]	48.00
length [m]	1.60
Number of magnet / period	4.00
Electron Beam Parameters	
Energy [GeV]	6.00
Current [Amp]	0.10
Emittx [m]	7.00E-09
Emittz [m]	7.00E-10
Betax [m]	5.00
Betaz [m]	5.00

なお、以下の計算結果は断らない限り光源から30m地点に置いた0.1mm x 0.1mmのスリットを通る光子数を計算した。

- 1) アングレータの光軸上でのスペクトルとそのギャップ依存性
アングレータの光軸上でのスペクトル

について、計算の結果を図3-1に示す。また、スペクトルのギャップ依存性を図3-2に示す。

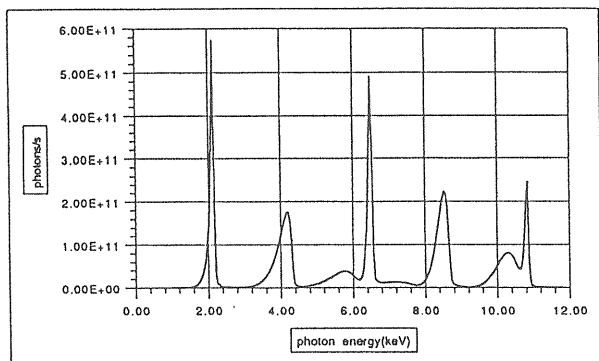


図3-1 アンジュレーター的光軸上でのスペクトル (ギャップ20mm)

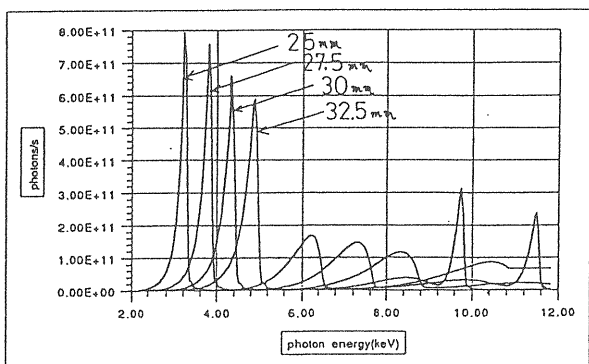


図3-2 アンジュレーター的光軸上でのスペクトルのギャップ依存性

(2) 光軸外でのスペクトルの変化およびについて

モニターを設計する上では、光軸から外れたところで、スペクトルがどのように変化するかが興味のあるところである。光軸を含んだ水平面内と垂直面内に軸外れのときのスペクトルの計算の結果を図3-2、3にそれぞれ示す。この計算ではギャップは20mmとした。

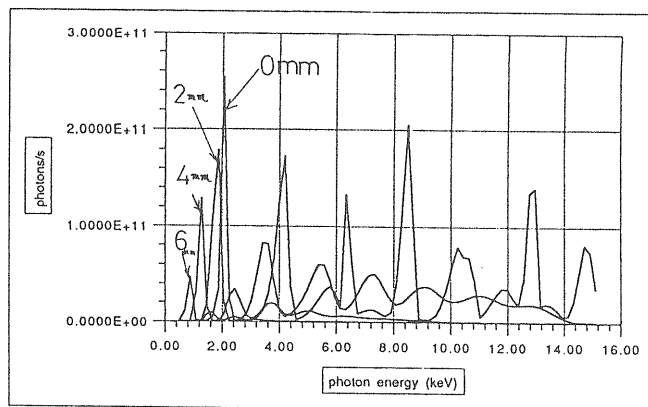


図3-2 光軸を含んだ水平面内に軸外れのときのスペクトル

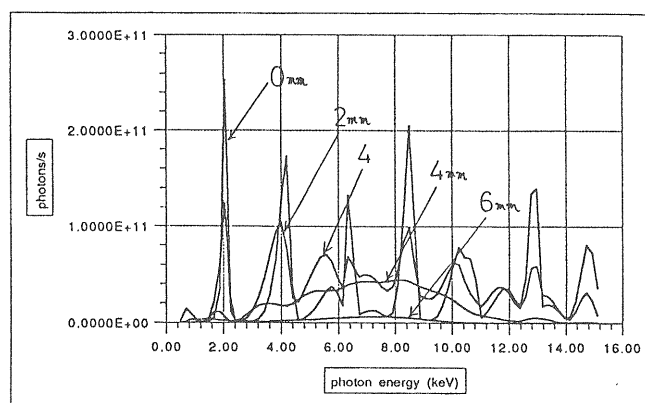


図3-3 光軸を含んだ垂直面内に軸外れのときのスペクトル

これらの図からわかるように、軸を外れると各ハーモニクスのピークは低エネルギー方向にシフトしていき、とくに次数の高いハーモニクスは急激に強度が弱くなる。

このように、場所によってスペクトルが異なる様な分布をしているので、モニターを考える時はたいへんややこしい。二章の5-1で解した様に、金属電極の光電子放出の断面積は光のエネルギーの方向に金属原子の電子構造を反映する不連続な点をもっている。光ビームの位置が変動したときに、光電極に当たっている光ビームのスペクトルが、この光電子放出の断面積の不連続な点を通すればこの電極の感度が不連続に変化することになる。

(3) 光ビームの空間的な強度分布

これまでに、アンジュレーターからの光ビームが、見る位置でスペクトルがどのように変化するかを、ざっとながめたが、次に、各ハーモニクスの空間的な強度分布はどのようにになっているかを眺めることにする。まず図3-4に1次から3次までのハーモニクスについて、 σ 偏光、 π 偏光についてシミュレーションによる空間的な強度分布図を示す¹⁴⁾。

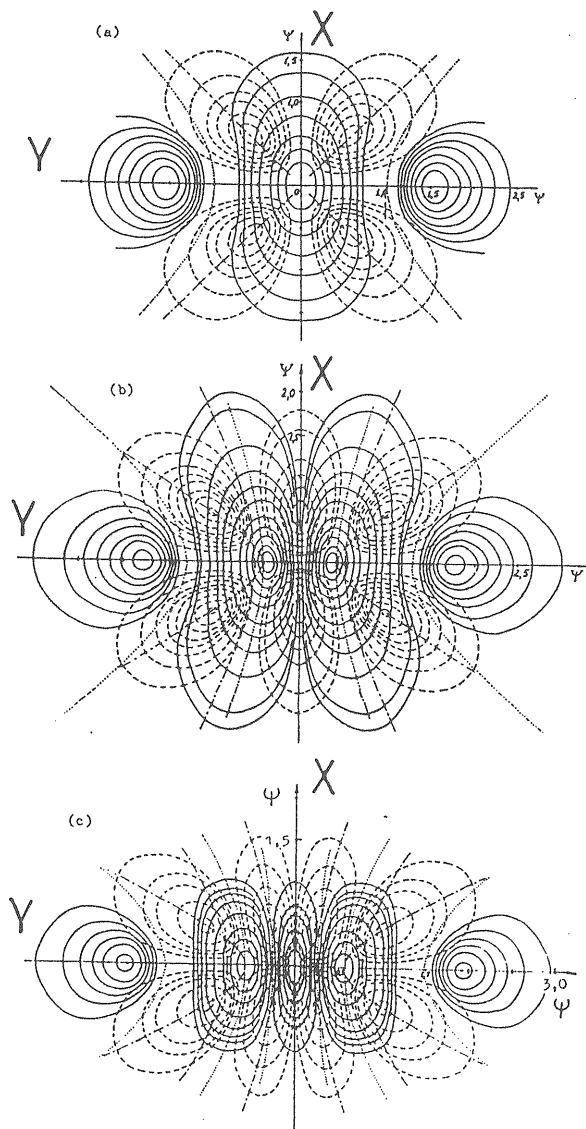


図3-4 1次から3次までのハーモニクスについて、 σ 偏光(実線)、 π 偏光(破線)についての空間的な強度分布 (a) 1次、(b) 2次、(c) 3次
また、図3-5(最後のページ)にフランスの

ACOで実際のアンジュレーターによって撮影された放射光(可視領域)の写真をしめす¹⁴⁾。

実際モニターはこれらのハーモニクスの光の重ね合わさった強度分布にを感じることになる。図3-6に上述のESRFのアンジュレーターについて、1次から7次までの(7次以上のハーモニクスは強度が弱いので、ここでは無視した)ハーモニクスを重ねた強度分布を示す。

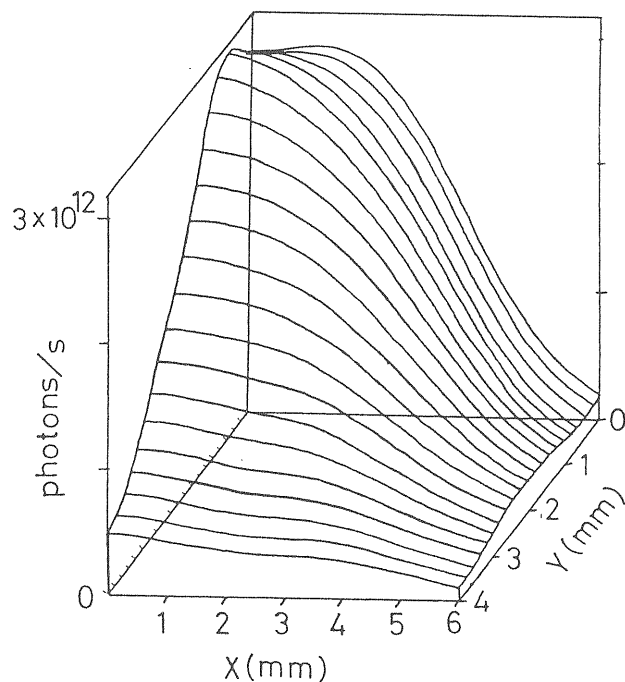


図3-6 1次から7次までのハーモニクスを重ねた強度分布

この図のように空間的には多少のつぺりとした構造になるが、裾野の方は多少構造をもっている。実際は、モニターの光電極の分光感度は一様ではないので、場所に応じて、波長の異なる分布があることはモニターの設計を難しくする。ここで、光ビームの開口角は挿入光源の場合概ね K/γ となるので、ギャップを最小ギャップから大きくしていくと(すなわちKを小さくしていくと)、光ビームの強度分布はそれにつれて狭くなっていき、スペクトルは上に示したように高エネルギーの方へシフトする。

第四章 偏光電磁石よりの放射光によるバックグラウンド

前章に述べたように、アンジュレーターなどの挿入光源よりの光ビームは複雑な構造をもっているが、それだけではなく、挿入光源の光には上下流にある偏光電磁石よりの放射光が重なってバックグラウンドになる。大抵の場合、挿入光源と上下流にある偏光電磁石の間には四極電磁石があるので、挿入光源の光の動きと偏光電磁石の光の動きとは位相が一致しないのでモニターにとっては、益々ややこしい状況になる。ここでは偏光電磁石のフリンジングフィールドによって発生する放射光について考える。第三章と同様にESRFの偏光電磁石を例に取る。図4-1にフリンジングフィールド¹⁰⁾を示す。

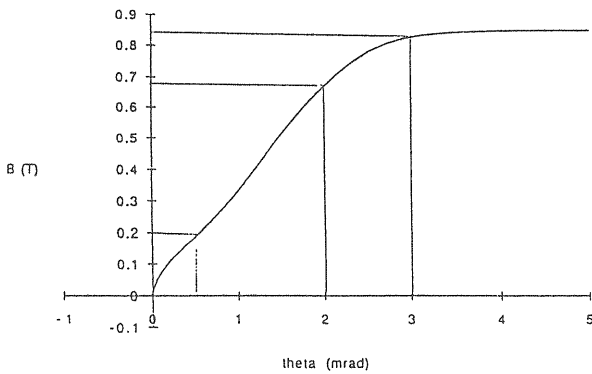


図4-1 ESRFの偏光電磁石のフリンジングフィールド

この図によれば、入り口から1 mradのところ、およそ3 kGauss、0.5 mradのところでも2 kGaussほどある。そこで、光電極をタングステンとすると、ほぼ1 keVの付近に光電子放出の断面積の極大があるので、このエネルギーの光が磁場

の強度でどう変わるかを知る必要がある。図4-2に1 keVの放射光の輝度（ブライトネス）の磁場依存性を計算したものを示す。スペクトルを積分して、30 m地点に置いた0.1 mm x 0.1 mmのスリットを通る光子数を求めると 10^9 photons/secのオーダーと見積られる。アンジュレーターの裾野あたりの光の強度は前章より、最小ギャップで 10^{11-12} photons/secのオーダーで、ギャップを大きくしていくと一桁程度小さくなるので、偏光電磁石のフリンジングフィールドによるバックグラウンドは、ほぼ0.1%程度である。よって挿入光源のギャップを動かしたときに、たいてい挿入光源の光の動きと偏光電磁石の光の動きとは位相が一致しないので実際の光の動きよりも大きく見える可能性がある。

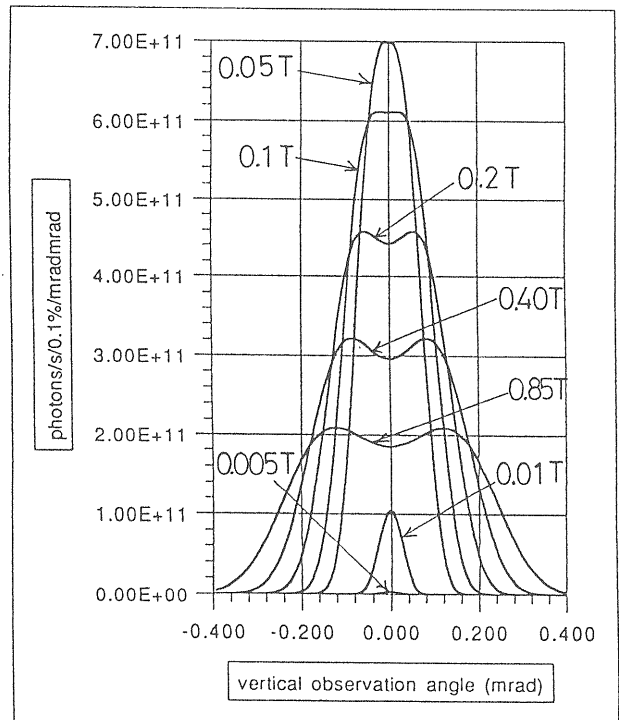


図4-2 偏光電磁石による1 keVの光強度の磁場依存性

このバックグラウンドを除くなり無視できる様な対策をとるには、一つの方法としては、ベリリウム（Be窓）をビームライ

ンに入れられるような場合は、ベリリウムのフィルターは効果的に長波長の成分を吸収するので、大変有効である（このような点からもビームラインの担当者と中良くしないと問題は解決しない）。ベリリウムのフィルターが挿入できないような場合（VUV軟X線専用のアンジュレーター等の場合）は光電極を光の芯の強い部分に近づければ、相対的にバックグラウンドは小さくなるが、この場合は光電極の冷却が大変である（金属の熱伝導では冷却しきれない場合もある）。

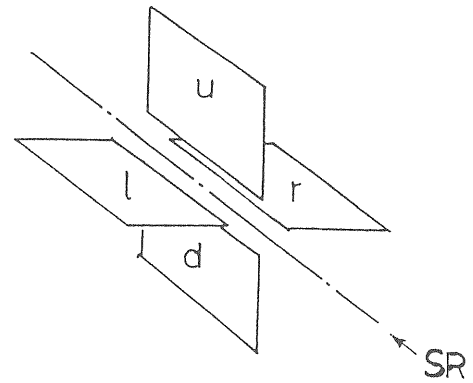


図5-1 4-ブレードモニターの光電極配置
このモニターでの光位置の読みだしは、上下左右の電極の出力を I_{up} , I_{low} , I_{left} , I_{right} とすると

第5章 挿入光源用モニターの実際

前のに章に書いたように挿入光源用の光位置モニターでは色々難しい問題が多いので、偏光電磁石光源用の光位置モニターのように作って入れればすぐ働くといったものは見受けられない。今のところ、ブレード型のモニターのブレード数を2枚から4枚にして、縦横の動きに対応しようとしたものが、ほとんどであるが、イオンチェンバーのリバイバルなどの動きもみうけられる。ここでは現在までに報告されている挿入光源用の光位置モニターについて紹介する。

5-1 4-ブレード型モニター

このモニターは1986年にBrookhavenのNSLSでアンジュレーター光源用に開発されたもので¹⁵⁾、図5-1に示すように4枚（縦横を観測するのに4枚いる）のタンクステン光電極（ブレード）をアンジュレーターよりの光ビームの裾野の部分に配置して、モニターをするものである。タンクステンブレードのアンジュレーター光による加熱を冷却するために、ヒートパイプを用いている。

$$P_{vertical} = C \frac{I_{up} - I_{down}}{I_{up} + I_{down} + I_{left} + I_{right}}$$

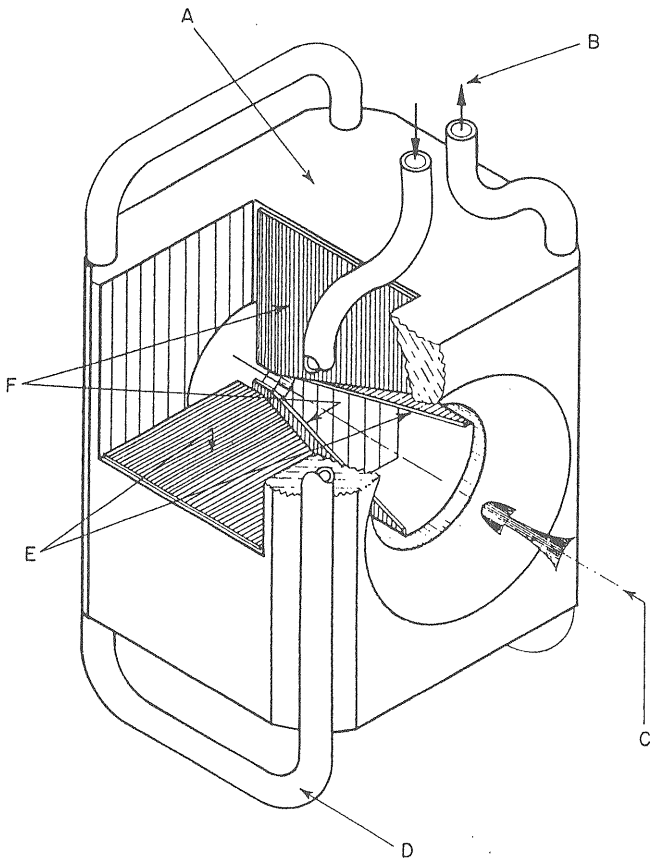
- 5 - 1

$$P_{horizontal} = C \frac{I_{left} - I_{right}}{I_{up} + I_{down} + I_{left} + I_{right}}$$

で与えられる。このモニターではそのままでは水平の2枚のブレードに偏光電磁石よりの放射光が強くあたるので、モニターの上流にセラミック製のマスクをおいて偏光電磁石よりの放射光が水平ブレードにあたるのを極力防いでいる。線形なダイナミックレンジは±1mm程度と報告されている。

5-2 4-ブレード改良型モニター

このモニターは1988年にブレード型モニターの改良型として、やはりBrookhavenのNSLSで作られたものである¹⁶⁾。全体に小型化されたのと（彼らはモノリシックと呼んでいる）水冷方式が、熱伝導のよい絶縁物のベリリアを用いた水冷式に変更されている。図5-2に概略を示す。

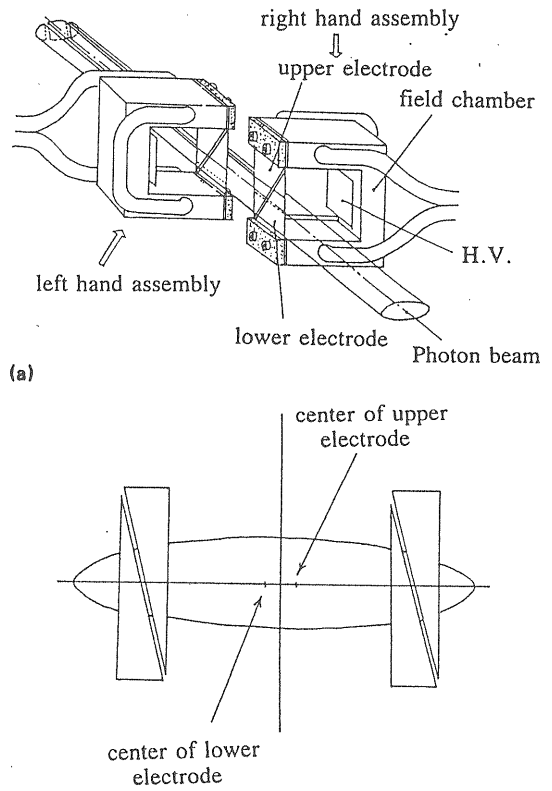


Phantom view of the monolith showing the blades and the cooling tubes. A—copper monolith, B—cooling water flow, C—direction of photon beam, D—cooling water tubes, E—horizontal blades, and F—vertical blades.

図5-2 4-ブレード改良型モニターの概略

5-3 挿入光源用二分分割モニター

モニターは二章の5-4に述べた二分分割モニターを挿入光源用に発展させたもので、図5-3に示すように4枚の直角三角形タンクステン光電極をアンジュレーターよりの光ビームの裾野の左右に配置して、モニターをするものである¹⁷⁾。左右の光電極の対は平行に配置されており、各電極への熱入力および電気的なバランスがトータルでキャンセルされるようになっている。



Outline of the monitor; (a) a schematic drawing of the monitor; (b) arrangement of the electrodes.

図5-3 挿入光源用二分分割モニターの概略

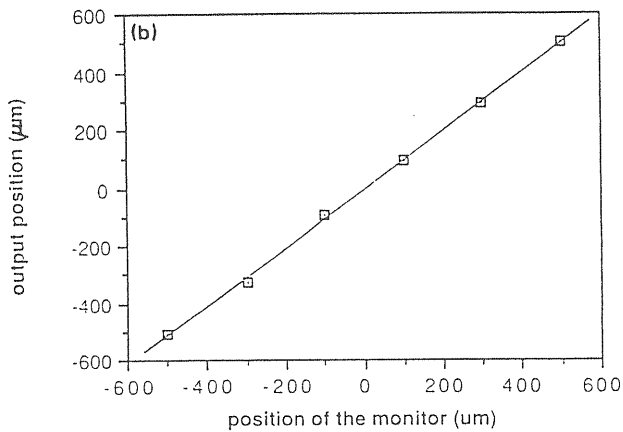
このモニターでの光位置の読みだしは、

$$P_{\text{vertical}} = C \frac{I_{l,u} + I_{r,u} - I_{l,d} - I_{r,d}}{I_{l,u} + I_{l,d} + I_{r,u} + I_{r,d}}$$

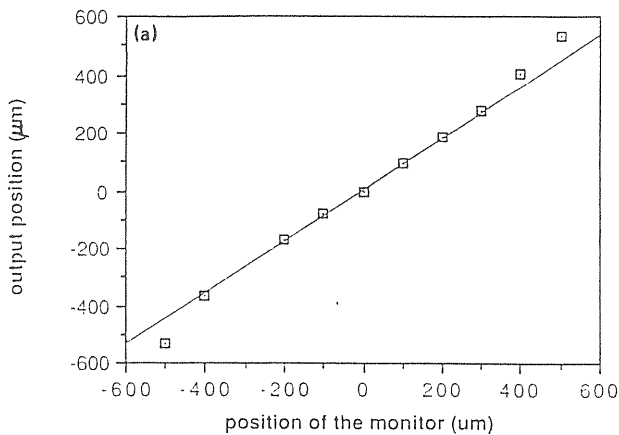
-- 3 - 2

$$P_{\text{horizontal}} = C \frac{I_{l,u} + I_{l,d} - I_{r,u} - I_{r,d}}{I_{l,u} + I_{l,d} + I_{r,u} + I_{r,d}}$$

このモニターではブレードは配置が挿入光源の光ビームの裾野の中に垂直になっているので、偏向電磁石からのバックグラウンドは比較的受けにくく、挿入光源の光ビームによるシグナル／偏向電磁石からのバックグラウンドは積極的にマスクで水平方向をしぼらなくても、500ぐらいである。図5-4に上下左右の位置レスポンスを示す。このモニターは水平にはただの2-ブレードモニターであるから、水平には線形性が悪い。



(A)



(B)

図5-4 上下左右の位置レスポンス (A) 上下、
(B) 左右

このモニターの問題点は、左右にの電極配置が非対称であるので、挿入光源のギャップを変えて、光ビームの太さが変わると光ビームが縦に動いた様に見えることである (図5-6)。

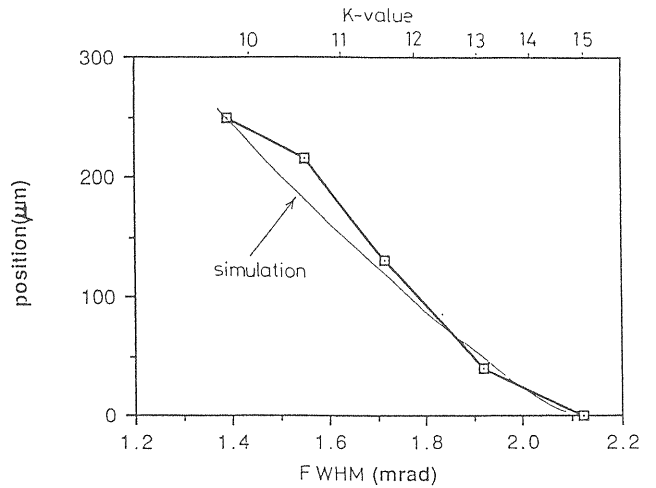


図5-6 挿入光源 (マルチポールウイグラー) のギャップを変えたときの縦方向のレスポンス

また、光ビームの左右の裾野は非線形で或るので、縦横の小さなカップリングが認められるが、実用的には問題となるほどではなく、0.1~0.2%程度である (図5-7)。

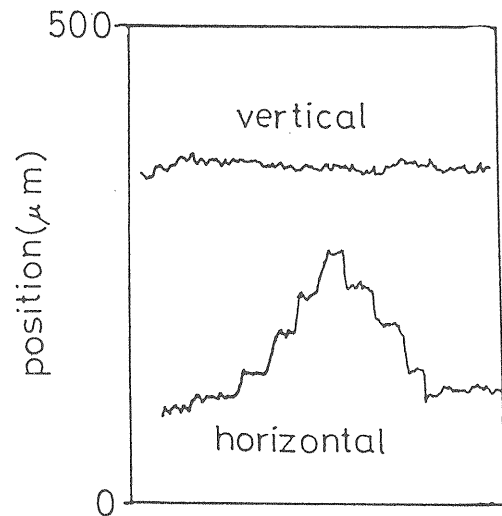


図5-7 モニターを横方向にスキャンしたときの縦方向の位置レスポンス

5-4 挿入光源用二分分割モニターの改良型

このモニターは、左右電極配置の非対称による問題を解消するためにデザインされたもので、電極のデザインが図5-8に示すように変更されている¹⁷⁾。

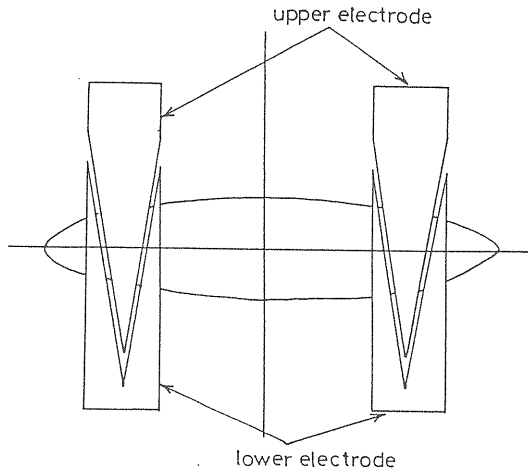


図 5-8 挿入光源用二分割モニターの改良型での電極配置

図 5-9 にこのモニターによる、挿入光源（マルチポールウィグラー）のギャップを変えたときの縦方向のレスポンスを示す。これによると、ギャップを変えたときの 200~300 μm のゴーストはかなり改善され、10~50 μm 程度になっている。

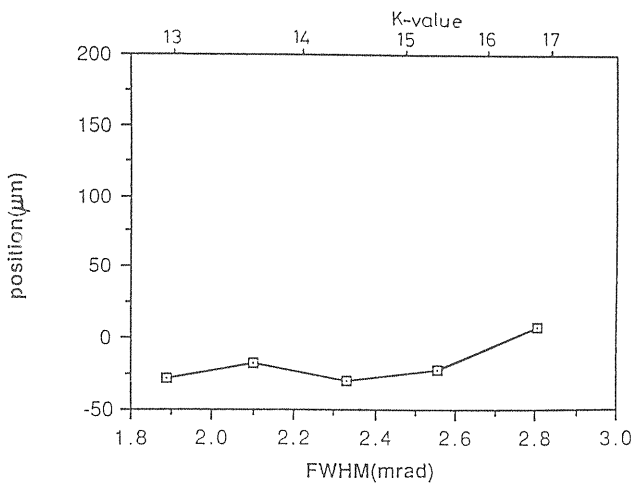


図 5-9 二分割モニター改良型の挿入光源（マルチポールウィグラー）のギャップを変えたときの縦方向のレスポンス

5-5 挿入光源用光位置モニターにおける影の効果

これらの挿入光源様のモニターは 4 枚のブレードを用いているので、光ビームの傾をみようとして、ビームラインの上下流に挿入しようすると、上流のモニターのブレードが作る影が必ず下流のモニターに影響を及ぼす。上の二分割モニターでは左右のブレードの間隔を変えてマスクを挿入することで、多少は良くなるが光源の有限なエミッタンスと光の回折効果のために影はボケるので、この効果を完全になくすのはなかなか難しい。この点でもビームラインの設計との関係で注意しなければならない点である。

5-6 挿入光源の光の強度分布に感度をもたせたモニター

ここでおしまいに一寸毛色の変ったモニターを紹介する。このモニターは Hamburg の Desy でユーザーの Ruffer らが開発したもので¹⁸⁾、基本的にはイオンチェンバーのリバイバルである。2-3 で紹介した二分割陰極型イオンチェンバーの陰極に、6 チャンネルのストリップラインに分割したものをもちいており、この 6 チャンネルの出力により光ビームの縦方向の強度分布のプロジェクトションを測定するものである。図 5-10 に概略を示す。

このモニターによって、HASYLAB で測定された光ビームのプロファイルおよび光位置を図 5-11、12 にそれぞれ示す。

このモニターはイオンチェンバーであるので、X 線用でないと使用できないが、プロファイル敏感型の方向はこれからのモニター開発に指針を示すものである。

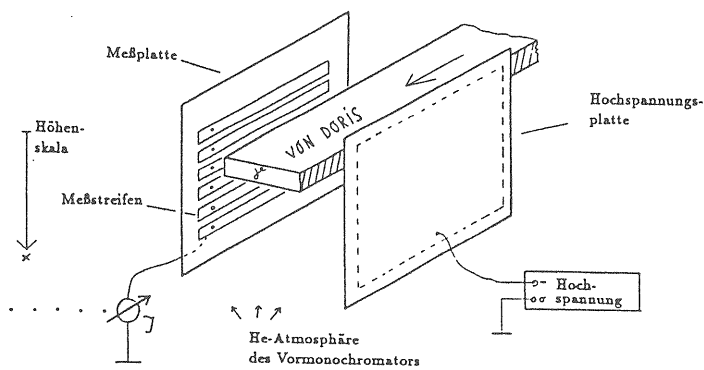


図5-10 プロファイル敏感型イオンチェンバーの概略

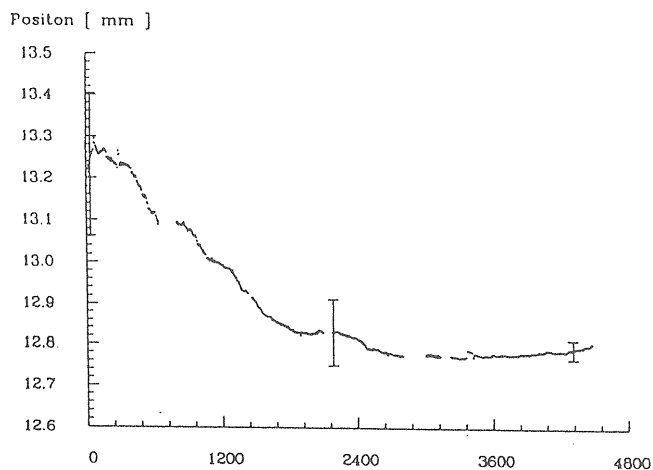


図5-12 プロファイル敏感型イオンチェンバーによる光ビーム位置の測定例

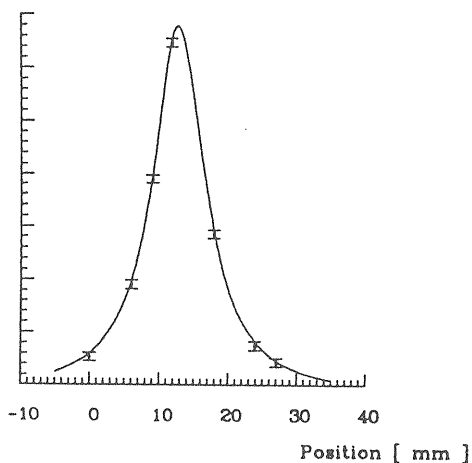


図5-11 プロファイル敏感型イオンチェンバーのプロファイルレスポンス

おわりに

光位置モニターについて述べてきたが、著者の浅学のために重要なアイデアであるにもかかわらず紹介にもれたものもあると思うので、この点は御了解いただきたい。光モニターをここ数年手掛けてきた著者としては、放射光そのものの理解が（とくに挿入光源の場合）ひじょうに重要なポイントになるので紙面をたくさんさいたつもりではあるが、これだけのテーマで教科書が一冊書けるようなものであるから、不十分なところが多と思われるので、この点は参考文献をご覧ください。

現在までに偏向電磁石光源用の光位置モニターは、ほぼ開発が終わり、メーカーに発注してできてきたものをビームラインに挿入すれば、ビームラインとのマッチングがよければ（モニターの担当者がビームラインの担当者とケンカしていないか注意！！）問題なく働くところまでできている。またこのモニターを利用して、光軸を安定化するようなフィードバックシステム

も、あちこちのファシリティーで実用化されつつある。目を転じて、挿入光源用のモニターでは、フリーチューニングさえしなければまあなんとか使えるものが出来たというのが現状であろう。この挿入光源用のモニターではブレード間の出力の差をとるといふ点が本質的にネックとなっている。差という量はほんの一寸の変化にも大変敏感で、このために偏向電磁石光源用の光位置モニターでは感度 $1\ \mu\text{m}$ 以下というモニターが出来たわけであるが、挿入光源用のモニターではこれが仇になり、ギャップを動かして光ビームのプロファイルが変わると、ひどい時には発狂してしまうこともある。この点で、最後に紹介したRUFFERさんのプロファイル敏感型のモニターは将来への指針を示すものである。これからは、ユーザーが自由に挿入光源をフリーチューニングするようになる（PFではなりつつある）であろうから、これらのモニター開発への期待も大きい。本講義（ノート）の計算結果はESRFにおいて作られ一般に公開されている計算コードRADIAによった¹⁹⁾。待 t 図 3-4、5 はESRFのDr.P.Elleaumeに提供していただいた。また、ESRFのDr.F.LoyerにはESRFの光位置モニターについて色々と情報をいただいたので、合わせて感謝するものです。

参考文献

- 1) B. Chance, S. Khalid, M.Zhang, J.Sorge and L. Thomas, Synchrotron Radiation News,2, 25-29 (1989).
- 2) J. Tichler and P.C. Hartman , Nucl. Instr. and Meth., 172, 67 (1980).
- 3) R.O. Hettel, IEEE trans. on Nucl. Sci. NS-30, 4, 2228 (1983).
- 4) P.M. Stefan, D. P. Siddons and J.B. Hastings, Nucl. Instr. and Meth., A255, 598 (1987).
- 5) 小林正典、OHO'87 III-6 (1987).

- 6) F. Loyer, private comunication.
- 7) T. Katsra et al., Photon Factory activity Report, No.4, 67 (1983).
- 8) S.M. Heald, Nucl. Instr. and Meth., A246, 411 (1986).
- 9) 小山篤、野村昌治、技術研究会報告集 (分子研) 71 (1987) .
- 10) F. Loyer, private comunication.
- 11) T. Mitsuhashi, K. Haga and T. Katsura, Proc. of IEEE particle Accelerator Conference, 576 (1987).
- 12) B.K. Karlin, P.L. Cowan and J.C. Woicik, Rev.Sci.Instrum. 63, 526 (1992).
- 13) T. Miyahara and T. Mitsuhashi,63, 538 (1992).
- 14) P. Elleaume, private comunication.
- 15) P. Mortazavi, M. Woodle, H. Rarback, D.Shu and M. Howels, Nucl. Instr. and Meth. A246, 389 (1986).
- 16) E.D. Johnson and T Oversluizen, Rev. Sci. Instrum. 60 (7), 1947 (1989).
- 17) T. Mitsuhashi, A. Ueda and T. Katsura, Rev.Sci.Instrum. 63, 534 (1992).
- 18) R. Ruffer, private comunication.
- 19) J.Chavanne and P. Elleaume, RADIA Version 3.1, 1993.ESRF

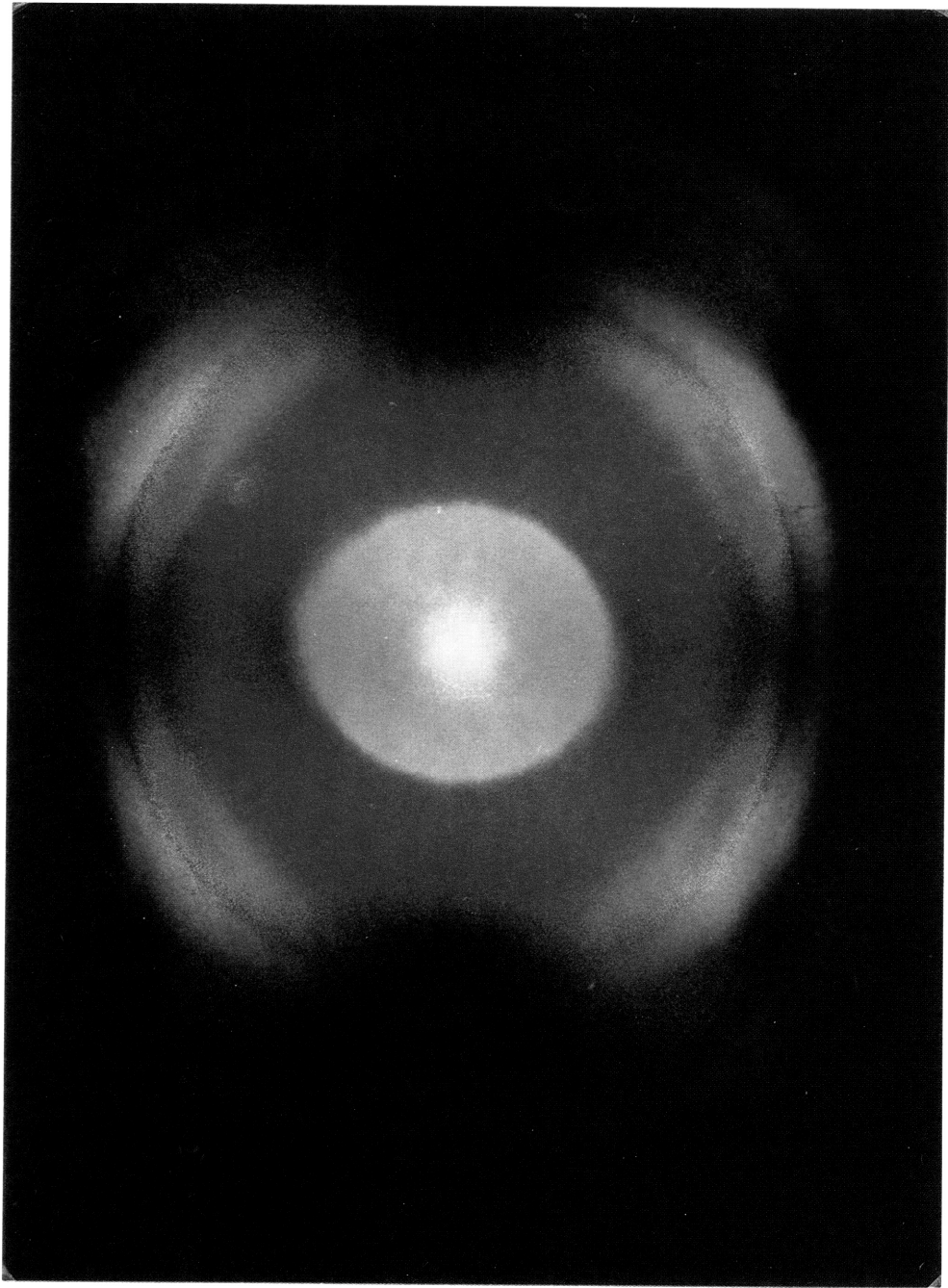


図 3-5 フランスのACOで実際のアンジュ
レータによって撮影された放射光
(可視領域) の写真